МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



Check for updates

УДК 621.791.14 *Научная статья*
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-376-386



EDN: LFCYNM

Преимущества сварки трением штуцеров с конической контактирующей формой малого диаметра

Ю.В. Полетаев, **В.В. Щепкин**✉
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ shepkinviktor@rambler.ru

Аннотация
Введение. По свидетельствам многочисленных производственных испытаний, применение ручной дуговой сварки (РДС) толстостенных штуцеров малого диаметра (до 80 мм) не обеспечивает получения качественного сварного соединения, удовлетворяющего требованиям нормативно-технических документов атомных электрических станций (АЭС). Решение указанной проблемы возможно на основе разработки технологии сварки с оптимальным тепловложением и применения ее взамен РДС. Существующие технологии сварки плавлением не позволяют обеспечить оптимальное регулируемое тепловложение. Однако это может быть реализовано при разработке и дальнейшем использовании способа сварки трением (СТ). Поэтому цель данной работы заключалась в разработке технологии на основе автоматизированного способа сварки трением, позволяющей повысить качество сварных соединений штуцеров малого диаметра энергетического оборудования до уровня нормативных требований.
Материалы и методы. Использовали штуцеры малого диаметра с конусной контактирующей поверхностью из низколегированной стали 10ГН2МФА. Экспериментальное исследование выполняли на машине сварки трением МСТ–41. Использованы методы неразрушающего и разрушающего контроля качества в соответствии с нормативно-технической документацией атомного энергетического машиностроения.
Результаты исследования. Разработана методика и определены оптимальные размеры конусной контактирующей поверхности при сварке. Показано, что оптимальное тепловложение при сварке трением достигается при подготовке конусной контактирующей поверхности в диапазоне углов $\alpha = 30^{\circ}–40^{\circ}$. Экспериментально отработана методика и параметры режима сварки трением моделей штуцеров малого диаметра. В ходе исследований получена и описана циклограмма процесса сварки трением, подтвердившая стадийное формирование сварного соединения за счет последовательного включения в стадию нагрева кольцевых участков конической поверхности соединяемых деталей. Получены результаты неразрушающего и разрушающего контроля, подтвердившие наличие качественного сварного соединения на уровне требований нормативно-технических документов АЭС.
Обсуждение и заключение. Полученные результаты исследований могут быть использованы для разработки технологии сварки трением патрубков, а также изделий из углеродистых и низколегированных сталей.

Ключевые слова: имитатор штуцера, ручная дуговая сварка, сварка трением, коническая поверхность, циклограмма, параметры режима, оптимальное тепловложение, механические свойства

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Полетаев Ю.В., Щепкин В.В. Преимущества сварки трением штуцеров с конической контактирующей формой малого диаметра. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):376–386. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-376-386

Original article

Advantages of Friction Welding of Fittings with Small Diameter Conical Contact Form

Yuri V. Poletaev, **Viktor V. Shchepkin** ✉
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ shepkinviktor@rambler.ru

Abstract
Introduction. As numerous production tests show, the use of manual arc welding (MAW) of thick-walled fittings of small diameter (up to 80 mm) does not provide a high-quality weld joint that meets the requirements of regulatory and technical documents of nuclear power plants (NPP). The solution to this problem is possible on the basis of research and development of welding technology with optimal heat input instead of MAW. Existing fusion welding technologies do not allow for optimal regulated heat input. However, this can be realized during the development and further use of the friction welding (FW) method. Therefore, this work aimed at developing a technology based on an automated technique of friction welding, which could provide the enhancing of the quality of weld joints of small diameter fittings of power equipment to the level of regulatory requirements.
Materials and Methods. Small diameter fittings with a conical contact surface made of low-alloy steel 10GN2MFA were used. The experimental study was performed on a friction welding machine MST–41. Methods of non-destructive and destructive quality control were used in accordance with the regulatory and technical documentation of nuclear power engineering.
Results. A methodology was developed, and the optimal dimensions of the conical contacting surface under welding were determined. It was shown that optimal heat input during friction welding was achieved by preparing a conical contacting surface in the angle range α = 30º–40º. The methodology and parameters of the friction welding mode for models of small diameter fittings were experimentally tested. In the course of the research, a cyclogram of the friction welding process was obtained and described, which confirmed the stage-by-stage formation of the weld joint due to the sequential inclusion of annular sections of the conical surface of the connected parts in the heating stage. The results of non-destructive and destructive testing were obtained, confirming the presence of a high-quality weld joint at the level of the requirements of the regulatory and technical documents of the NPP.
Discussion and Conclusion. The obtained research results can be used to develop the technology of friction welding of pipes, as well as products made of carbon and low-alloy steels.

Keywords: fitting simulator, manual arc welding, friction welding, conical surface, cyclogram, mode parameters, optimal heat input, mechanical properties

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Poletaev YuV, Shchepkin VV. Advantages of Friction Welding of Fittings with Small Diameter Conical Contact Form. *Advanced Engineering Research (Rostov-on-Don)*. 2023;23(4):376–386. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2023-23-4-376-386

Введение. Основной проблемой сварки штуцеров малого диаметра является малая протяженность сварных швов, что не позволяет полностью контролировать качество процесса ручной дуговой сварки. Подвод сварочной аппаратуры к месту сварки также не всегда технологически возможен.

Вварные и приварные штуцеры соединяются с основной деталью угловым швом способом ручной дуговой сварки покрытым электродом. Вварные штуцера приваривают снаружи или изнутри с конструктивным непроваром. В любом случае наличие незавариваемых зазоров в соединениях, являющихся концентраторами напряжений, снижает работоспособность конструкции, так как может быть причиной возникновения трещин. Более совершенным является соединение, не имеющее незаваренный зазор. Иногда с целью получения гарантированного провара всей стенки штуцера и исключения возможности образования трещины от непровара используют удаляемую после сварки формирующую кольцевую подкладку или вваривают толстостенную заготовку патрубка. После сварки ее рассверливают до заданного чертежом внутреннего диаметра (рис. 1). Это довольно трудоемко, но оправданно в ответственных конструкциях, например, при изготовлении оборудования атомных электростанций [1]. Данный способ изображен на рис. 1, где изображен штуцерный узел до (*а*) и после сварки (*б*). Здесь: *D* — внутренний диаметр штуцера; *h, b* — катеты сварного соединения; *S* — толщина стенки

штуцера. Согласно нормативному документу[1], из которого заимствован рисунок, допускаемый размер на толщину стенки штуцера должен быть ≥2 мм; притупление сварного соединения — 4±1 мм; угол разделки кромок под сварку — 50°±5°.

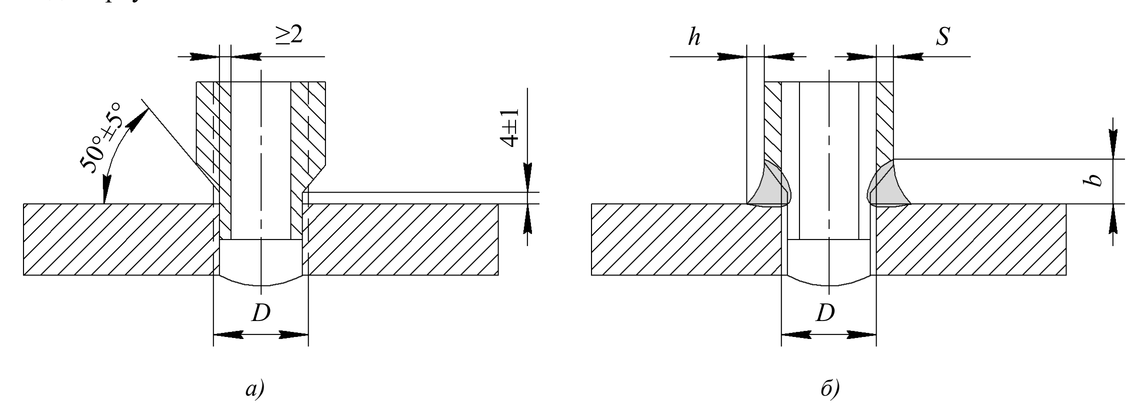


Рис. 1. Штуцерный узел: *а* — до сварки; *б* — после сварки и удаления корня шва

Для приварки штуцера выполняются следующие технологические операции: точение отверстия в корпусе, разделка кромок на штуцере, сборка узла с соблюдением перпендикулярности, прихватка штуцера, многопроходная сварка, удаление корневой части сварного шва путем расточки внутреннего диаметра до нормативных размеров.

Известные недостатки РДС не позволяют обеспечить стабильное качество сварного соединения и характеризуются большим объемом литого металла шва в ограниченном пространстве. Это приводит к перегревам и высоким остаточным напряжениям, что требует проведения дополнительных операций в виде термообработки. Стоимость ремонта оборудования в случае поломки высока. Это приводит к временным и экономическим затратам [2–6].

Анализ результатов литературного обзора и производственного опыта свидетельствуют о технической и экономической целесообразности отказа от использования способа РДС для получения сварных толстостенных соединений штуцеров и патрубков малого диаметра (до 80 мм) [7, 8].

В этой связи было решено исследовать влияние формы разделки кромок и способа сварки трением взамен РДС с целью обеспечения оптимально-минимального тепловложения и стабильного качества сварных соединений. Сварка трением как раз характеризуется оптимальным тепловоложением (по сравнению со способами сварки плавлением), при котором формируется мелкозернистая структура с низким уровнем остаточных сварочных напряжений и высоким уровнем механических свойств [9, 10].

Цель работы заключается в повышении до уровня нормативных требований качества сварных соединений штуцеров малого диаметра энергетического оборудования на основе разработки автоматизированного способа сварки трением.

Материалы и методы. Теоретические и экспериментальные исследования выполнены на сварных соединениях из низколегированной стали 10ГН2МФА, используемой в качестве основного конструкционного материала для изготовления парогенератора, компенсатора давления и другого ответственного оборудования АЭС[2].

В работе использовали расчетно-экспериментальный метод выбора оптимальной формы соединяемых поверхностей при сварке.

Разработанную технологию сварки трением реализовали при выполнении сварных соединений штуцеров на установке МСТ-41.

Для оценки качества сварных соединений использовали методы и объемы неразрушающего (радиографический, ультразвуковой, визуально-измерительный, определение твердости) и разрушающего (испытания статической прочности и ударного изгиба, металлографические исследования сварного соединения) контроля, применяемые при изготовлении сварных конструкций АЭС.

[1] *Основные положения по сварке и наплавке узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок* ОП 1513-72. URL: https://docs.cntd.ru/document/564412851 (дата обращения: 02.08.2023).

[2] *Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок* НП-104-18. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 554 от 14.11.2018 г. Консультант плюс. URL: https://sudact.ru/law/prikaz-rostekhnadzora-ot-14112018-n-554-ob/np-104-18/ (дата обращения: 02.08.2023).

С учетом технологических возможностей СТ на первом этапе была опробована технология сборки без подготовки кромок в виде «классического» таврового соединения (рис. 2 *а*) [11]. Параметры режима сварки были выбраны в соответствии с рекомендациями, изложенными в [11].

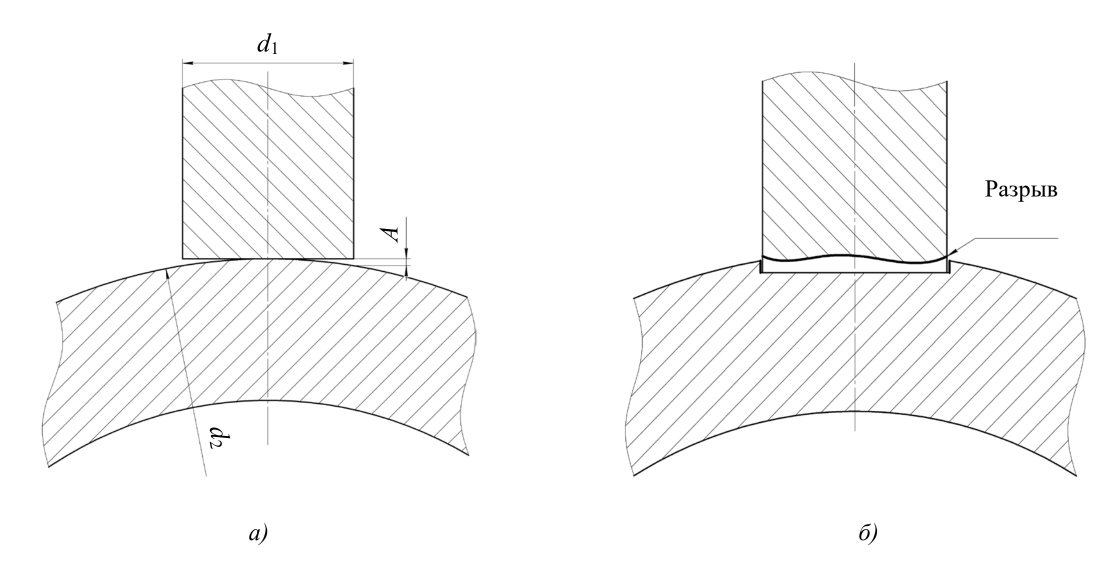


Рис. 2. Имитаторы штуцерного узла: *а* — имитатор таврового соединения; *б* — соединение с предварительной выточкой канавки: d_1 — диаметр имитатора штуцера; d_2 — диаметр имитатора корпуса; *A* — зазор

Результаты исследования. Контроль качества показал, что сборка штуцера и цилиндрического корпуса оборудования обеспечивает получение между корпусом и штуцером зазора *A*, величина которого меняется в зависимости от диаметра корпуса d_2 и штуцера d_1. Такая форма стыка не обеспечивает равномерного нагрева контактирующей поверхности, что приводит к образованию участков пластичного материала и проскальзыванию их с нарушением сварного стыка.

Учитывая отрицательные результаты СТ на первом этапе, на втором этапе была предложена и отработана технология сварки трением с предварительной выточкой канавки на корпусе (рис. 2 *б*). Как показали результаты экспериментов, в начальной стадии сварки произошел разогрев кольцевой части, нарушение центровки и последующий отрыв нижней части имитатора штуцера, что в конечном итоге привело к формированию бесформенного сварного соединения.

В ходе проведенных экспериментальных исследований было выявлено, что для получения качественного сварного соединения основания большой толщины с некоторым радиусом кривизны и толстостенного штуцера малого диаметра, полученного способом сварки трением, необходимо:

– разработать конструкцию соединяемых поверхностей, обеспечивающую надежное соединение и высокие механические характеристики сварного соединения штуцеров малого диаметра в состоянии без последующей термической обработки или с термообработкой до более низких температур;

– обеспечить оптимальный нагрев стыкуемых поверхностей за счет применения обоснованных значений параметров режима сварки.

Анализ полученных экспериментальных данных свидетельствует о необходимости разработки конструкции соединяемых поверхностей, которые обеспечат более равномерный нагрев и формирование при СТ качественного соединения. Одним из вариантов получения такого соединения была выбрана коническая форма поверхностей [12–15].

В процессе выбора оптимальной контактирующей поверхности выполнен поверочный расчет прочности сварных соединений цилиндрической и конической форм (рис. 3). Расчеты для цилиндрической поверхности производили по формуле [16]:

$$N_ц = \left[\sigma_p\right] \cdot L \cdot S, \quad (1)$$

где $[\sigma_P]$ — предел прочности, МПа; *L* — длина сварного шва, мм; *S* — толщина сварного шва, мм.

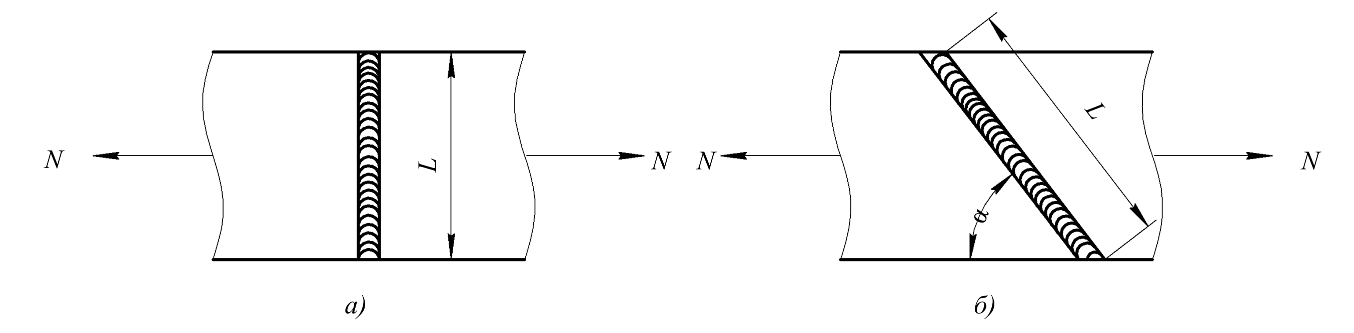


Рис. 3. Типы сварных соединений: *а* — цилиндрическая соединяемая поверхность; *б* — коническая соединяемая поверхность: *N* — нагрузка; *L* — длина сварного шва; α — угол соединяемых поверхностей

Расчеты для конической поверхности производили по формуле:

$$N_к = \frac{[\sigma_P] \cdot L \cdot S}{\sin\alpha} \tag{2}$$

Можно увидеть, что наименьшая длина сварного соединения и величина разрушающей нагрузки характерна для модели с цилиндрической контактной поверхностью. При переходе к конусной поверхности контакта длина сварного соединения и величина разрушающей нагрузки *N* закономерно увеличиваются. Эти характеристики напрямую зависят от величины угла α, оптимальный диапазон которой по результатам расчетов представлен в таблице 1.

Таблица 1

Влияние угла наклона α на показатели прочности

Тип соединения	Угол наклона, α,°	Нагрузка *N*, Н
Цилиндрический	–	59 283
Конический	30,0	118 566
	32,5	110 396
	35,0	101 609
	37,5	97 396
	40,0	94 959

Следует отметить, что необоснованное изменение величины α как в большую, так и в меньшую сторону будет приводить к снижению прочности (при уменьшении длины сварного шва) или увеличению перегрева и величины сварочных деформаций (при увеличении длины сварного шва).

В этой связи предложено использовать конусную контактирующую поверхность с одной стороны — на штуцере, с другой — ответную конусную поверхность на корпусе (рис. 4 *а*).

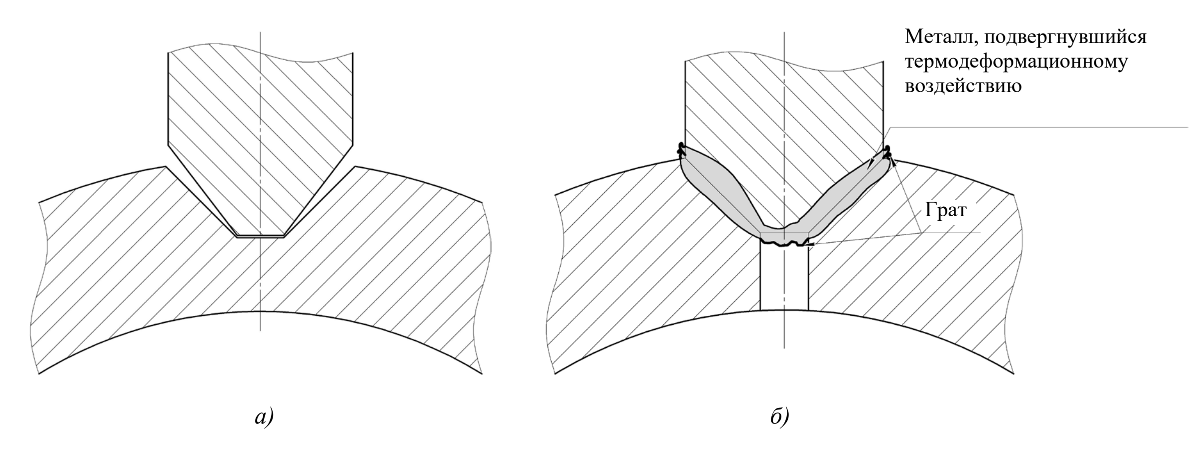


Рис. 4. Штуцерный узел: *а* — форма контактирующей поверхности; *б* — выполненное сварное соединение

Данная конструкция позволяет выполнять сварные соединения вне зависимости от диаметра корпуса, так как пластичный металл в процессе сварки равномерно заполняет соединяемую поверхность (рис. 4 *б*).

Так как разработанная конструкция обеспечивает равномерное заполнение разделки сварного соединения вне зависимости от формы корпуса, было предложено использовать плоскую поверхность корпуса для дальнейших экспериментальных исследований. Было выполнено конструирование и изготовление моделей штуцеров с разными углами конусной поверхности (рис. 5).

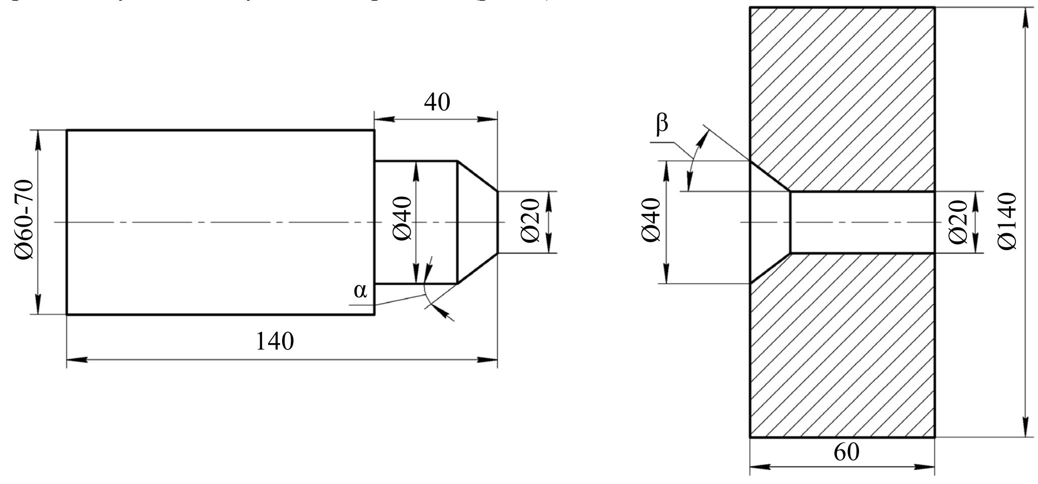


Рис. 5. Модель штуцерного узла: α — угол конуса штуцера; β — угол конуса корпуса

Размеры углов сопрягаемых поверхностей стыка были выбраны с учетом результатов расчетов, а также энергетической возможности сварочной машины МСТ-41 и ожидаемых размеров сварного соединения [18].

При подготовке поверхностей элементов моделей под сварку с углами конуса α = 30,0°; 32,5°; 35,0°; 37,5° и 40,0° сварные соединения качественно формировались при обосновано выбранных параметрах режима СТ. При этом наиболее качественное соединение получалось с углом поверхности 37,5°.

В ходе экспериментальных исследований была выявлена закономерность при формировании сварного соединения, а именно, происходил поэтапный процесс трения, нагрева и пластического деформирования по поверхности сварного соединения. Данные отличия от известных способов формирования соединений при СТ не позволяют использовать классическую циклограмму процесса сварки [11]. Это потребовало более детального изучения последовательности формирования соединения и описания циклограммы процесса в соответствии со спецификой (рис. 6)

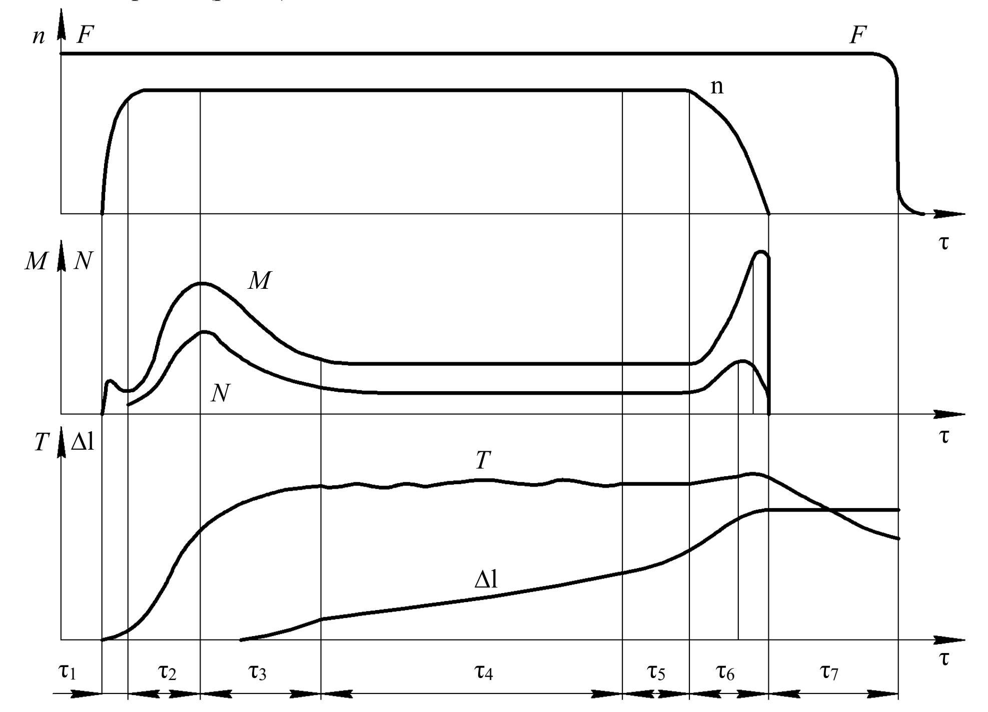


Рис. 6. Циклограмма процесса СТ:
n — угловая скорость; *F* — давление нагрева; *M* — момент трения; *N* — мощность тепловыделения; *T* — температура в зоне соединения; Δl — осадка; τ_1–τ_7 — фазы цикла

В процессе сварки фазы τ_1, τ_2, τ_3 схожи с первоначальными фазами СТ цилиндрических поверхностей. В первой фазе происходит притирка поверхности по отдельным микровыступам, но, в отличии от класических способов, притирка идет не по всей поверхности, а только на соприкасаемом с конусом участке. Во второй фазе происходит увеличение площади контактирующих поверхностей и, в следствие этого, рост температуры. Третья фаза характеризуется подъемом температуры и выделением пластифицированного металла (грата). Четвертая фаза τ_4 — фаза последовательного нагрева всей конусной поверхности. В данной фазе происходит частичный повтор процессов, протекающих во второй и третьей фазах. Отличие заключается в том, что участки, вступающие в процесс нагрева, уже частично подогреты. В пятой фазе τ_5 наступает процесс равномерного нагрева всей свариваемой поверхности, близкий к квазистационарному состоянию. Шестая τ_6 и седьмая τ_7 — фазы торможения и проковки, в которых происходит процесс полной остановки вращения и сжатия.

Реализация указанной циклограммы возможна при использовании разработанной методики расчета параметров режима сварки трением [17]. К основным параметрам относятся: время сварки $t_с$, давление нагрева $P_н$, скорость вращения V и давление проковки $P_п$. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры процесса СТ модели штуцера

Материал	Номер образца	Давление нагрева, МПа	Давление проковки, МПа	Скорость вращения, об/мин	Время сварки, с
Сталь 10ГН2МФА	10–1	0,323	0,539	1200	27
	10–2	0,367	0,539	1200	32
	10–3	0,340	0,539	1200	30

За счет последовательного включения в стадию нагрева кольцевых участков конической поверхности соединяемых деталей можно значительно уменьшить величину давления нагрева и увеличить время сварки.

Предложенные технологические решения позволяют получить качественные соединения при меньших параметрах режима, что снижает тепловложение в сварном шве, обеспечивая надежное соединение и минимальный рост зерна. Кроме того, при таком способе сварки вступающие в нагрев кольцевые участки в месте трения имеют прослойку из пластичного металла из предыдущего слоя, который выступает в роли смазывающего материала. Это снижает коэффициент трения и, тем самым, уменьшает требуемую мощность сварочной машины.

Авторами был выполнен контроль сварных соединений неразрушающими и разрушающими методами. Результаты контроля качества и механические свойства сварных соединений приведены в таблице 3. Результаты измерения твердости (рис. 7) и микроструктура (рис. 8) выполненных сварных соединений удовлетворяют требованиям нормативно-технических документов[3].

Значения твердости во всех образцах указывают на достаточно однородную структуру по всему сечению шва. Значений твердости, соответствующих твердости закалочных структур, не выявлено. На рис. 7 наблюдается небольшое увеличение твердости по линии сплавления. Для выравнивания значений по сечению соединения рекомендуется провести термообработку — термофиксацию.

Таблица 3

Результаты механических испытаний, рентгенографического и ультразвукового контроля выполненных сварных соединений штуцеров

Марка стали	Номер образца	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Предел текучести $\sigma_{0.2}$, МПа	Относительное удлинение δ, %	Относительное сужение ψ, %	Угол загиба	Ударная вязкость KCV, Дж/м^2	Контроль	
								РГД	УЗК
10ГН2МФА	10–1	635	595	14–17	70–78	123	251	уд	уд
	10–2	510	425	12–16	67–71	127	195	уд	уд
	10–3	770	650	15	68–70	125	273	уд	уд

[3] *Правила контроля металла оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок при изготовлении и монтаже. НП-105-18.* Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 554 от 14.11.2018 г. URL: https://docs.secnrs.ru/documents/nps/%D0%9D%D0%9F-105-18/%D0%9D%D0%9F-105-18.pdf (дата обращения: 10.09.2023).

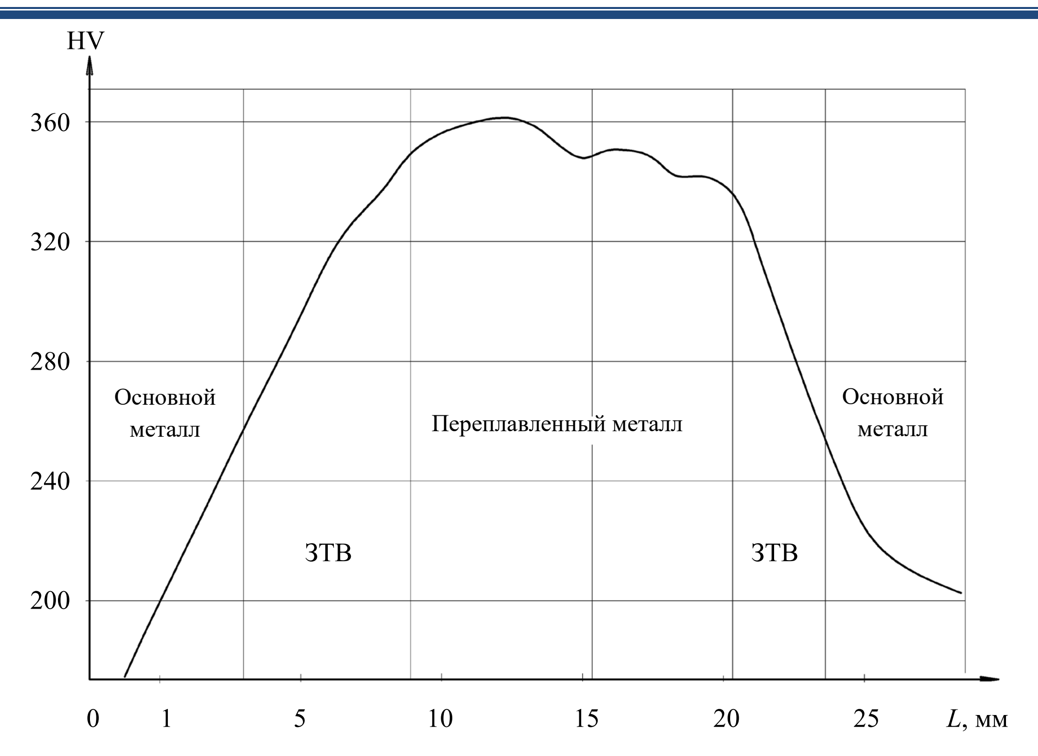


Рис. 7. Распределение твердости по ширине сварного соединения из стали 10ГН2МФА (ЗТВ — зона термического влияния)

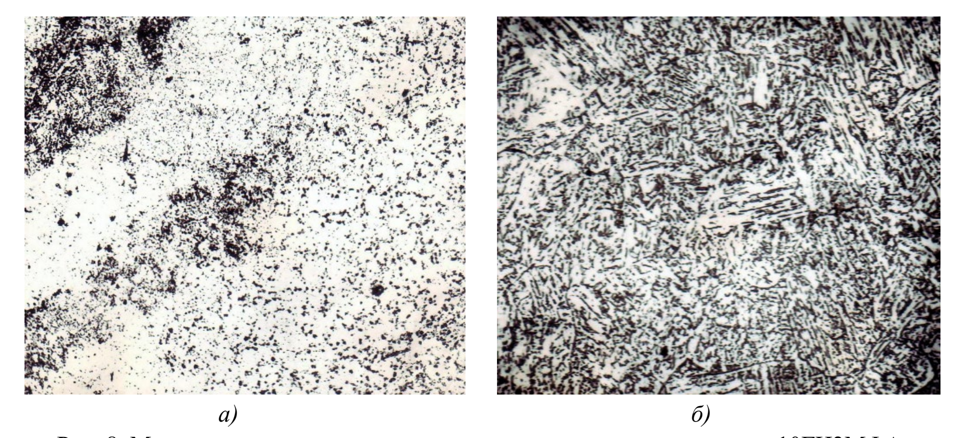


Рис. 8. Микроструктура различных зон сварного соединения из стали 10ГН2МФА, выполненного сваркой трением (×500): *а* — зона термического влияния; *б* — линия сплавления

Обсуждение и заключение. Высокое и стабильное качество сварного соединения достигается за счет оптимального тепловложения при сварке трением контактирующих поверхностей путем последовательного включения в процесс нагрева и трения кольцевых участков конусных сварных соединений. Это способствует измельчению структуры металла шва и зоны термического влияния и получению высоких механических свойств металла сварного соединения.

В результате экспериментального исследования установлено положительное влияние основных конструктивных и технологических факторов и, прежде всего, конусной формы соединяемых поверхностей на качество толстостенных сварных соединений штуцеров малого диаметра (до 80 мм). Полученные положительные результаты разрушающего и неразрушающего контроля подтверждают требуемое качество и перспективность применения сварки трением сварных соединений штуцеров с конусной поверхностью при изготовлении оборудования АЭС.

Список литературы

1. Сабитов М.Х., Поникаров С.И., Валеев С.И. Оценка ресурса безопасной эксплуатации газосепараторов с дефектами угловых сварных швов приварки штуцеров. *Вестник Казанского технологического университета*. 2013;16(15):118–120. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-resursa-bezopasnoy-ekspluatatsii-g-azoseparatorov-s-defektami-uglovyh-svarnyh-shvov-privarki-shtutserov/viewer (дата обращения: 20.08.2023).

2. Ермолаев В.В., Жученко Л.А., Любимов А.А., Гладштейн В.И., Кремер В.Л. Опыт реконструкции турбины ПТ–60–90 с проведением восстановительной термообработки корпуса цилиндра высокого давления. *Теплоэнергетика*. 2018;(6):5–14. https://doi.org/10.1134/S004036361806005X

3. Миронова Л.И., Федик И.И. Локальное тепловое нагружение двух пересекающихся цилиндрических оболочек вращения с переменной толщиной стенки. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2015;(1):83–87.

4. Ельчанинов А.А., Корчагин И.Б. Проектирование приспособления для приварки штуцеровки теплообменному аппарату. В: Т*руды победителей конкурса научно-исследовательских работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий «Научная опора Воронежской области»*. Воронеж: Воронежский государственный технический университет; 2020. С. 224–226. URL: https://studfile.net/preview/16729056/page:23/ (дата обращения: 28.08.2023).

5. Dolgachev Yu.V., Pustovoit V.N. Interaction of Ferromagnetically Ordered Clusters with Dislocations in Austenite and Twinning. *Materials Science Forum*. 2022;1052:134–139. https://doi.org/10.4028/p-a8jty9

6. Assaulenko S.S., Lyudmirsky Yu.G., Kharchenko V.Y., Chernogorov A.L. Computer-Digital Technique for Evaluating the Geometry of the Interface of the Weld with the Base Metal. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;1001:012038. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012038

7. Cleiton Carvalho Silva, Arlindo Braga de Souza Neto, Francisco Diego Araruna da Silva, Francisco Edval Sampaio de Freitas Júnior, Jesualdo Pereira Farias. Welding of ASTM A106 Gr. B Steel Pipes for High-Temperature Service — Part 1 — Residual Stress Analysis. *Welding International*. 2009;23(4):270–281. https://doi.org/10.1080/09507110802543476

8. Maodong Kang, Ming Jiang, Soumya Sridar, Wei Xiong, Zhixiong Xie, Jun Wang. Effect of Multiple Repair Welding on Crack Susceptibility and Mechanical Properties of Inconel 718 Alloy Casting. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022;31(1):254–261. https://doi.org/10.1007/s11665-021-06173-6

9. Kaimeng Wang, Hongyang Jing, Lianyong Xu, Lei Zhao, Yongdian Han, Kai Song, et al. Fracture Mechanism of a Ni-Base Alloy under High-Temperature Cyclic Deformation: Experiments and Microstructure Characterization. *Materials Characterization.* 2022;189:111944. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111944

10. Lyudmirskii YuG, Assaulenko SS, Ageev SO. Constructive and Technological Method of Increasing Durability of "Choke Connections". *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131:042061. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/4/042061

11. Гнюсов С.Ф., Хазанов И.О., Советченко Б.Ф., Дегтяренко Е.А., Киселёв А.С., Трущенко Е.А. и др. *Применение эффекта сверхпластичности сталей в инструментальном производстве*. Монография. Томск: Изд-во науч.-технической лит.; 2008. 237 с.

12. Poletaev Yu.V., Poletaev V.Yu., Shchepkin V.V. Friction Welding of Fittings and Nozzles from Low-Alloy Steel 15Х2НМФА. *Welding International*. 2020;34(1–3):29–33. https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1919446

13. Shchepkin V., Poletaev Yu. Friction Welding of Fasteners from Austenite Steels. *E3S Web of Conferences*. 2020;210:08012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021008012

14. Schepkin V., Poletaev Yu. Friction Welding of Carbon Quality Steel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131:042062. http://10.1088/1742-6596/2131/4/042062

15. Полетаев Ю.В., Полетаев В.Ю., Щепкин В.В. Сварка трением штуцеров и патрубков из низколегированной стали 15Х2НМФА. *Сварочное производство*. 2018;(7):13–18.

16. Коновалов А.В., Куркин А.С., Макаров Э.Л., Неровный В.М., Якушкин Б.Ф. *Теория сварочных процессов.* Неровный В.М. (ред.) Москва: Издательство Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана; 2007. 752 с.

17. Щепкин В.В., Полетаев Ю.В., Рогозин Д.В. Метод расчета параметров режима сварки трением соединений конической формы. В: *Труды XXIV Международной научно-практической конференции в рамках Агропромышленного форума юга России «Состояние и перспективы развития агропромышленного комплекса», выставок «Интерагромаш», «Агротехнологии».* Ростов-на-Дону: ДГТУ-ПРИНТ; 2021. С. 490–493. https://doi.org/10.23947/interagro.2021.490-493

References

1. Sabitov MKh, Ponikarov SI, Valeev SI. Assessment of the Resource of Safe Operation of Gas Separators with Defects in Fillet Weld Fitting Welding. *Herald of Kazan Technological University*. 2013;16(15):118–120. https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-resursa-bezopasnoy-ekspluatatsii-g-azoseparatorov-s-defektami-uglovyh-svarnyh-shvov-privarki-shtutserov/viewer (accessed: 20.08.2023). (In Russ.)

2. Ermolaev VV, Zhuchenko LA, Lyubimov AA, Gladshtein VI, Kremet VL. Experience in Reconstructing the PT-60-90 Turbine Reconstruction of the Turbine PT-60-90 by Reconditioning Heat Treatment of the High-Pressure Cylinder Shell. *Thermal Engineering*. 2018;(6):5–14. https://doi.org/10.1134/S004036361806005X

3. Mironova LI, Fedik II. Local Thermal Loading of Two Intersecting Cylindrical Rotational Shells with a Variable Wall Thickness. *Engineering and Automation Problems*. 2015;(1):83–87.

4. Elchaninov AA, Korchagin IB. Design of a Device for Welding Fittings to a Heat Exchanger. In: *Collection of Works of the Winners of the Competition of Research Works of Students and Graduate Students of VSTU in Priority Areas for the Development of Science and Technology*. Voronezh: Voronezh State Technical University; 2020. P. 224–226. https://studfile.net/preview/16729056/page:23/ (accessed: 28.08.2023). (In Russ.)

5. Dolgachev YuV, Pustovoit VN. Interaction of Ferromagnetically Ordered Clusters with Dislocations in Austenite and Twinning. *Materials Science Forum*. 2022;1052:134–139. https://doi.org/10.4028/p-a8jty9

6. Assaulenko SS, Lyudmirsky YG, Kharchenko VY, Chernogorov AL. Computer-Digital Technique for Evaluating the Geometry of the Interface of the Weld with the Base Metal. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;1001:012038. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012038

7. Cleiton Carvalho Silva, Arlindo Braga de Souza Neto, Francisco Diego Araruna da Silva, Francisco Edval Sampaio de Freitas Júnior, Jesualdo Pereira Farias. Welding of ASTM A106 Gr. B Steel Pipes for High-Temperature Service — Part 1 — Residual Stress Analysis. *Welding International*. 2009;23(4):270–281. https://doi.org/10.1080/09507110802543476

8. Maodong Kang, Ming Jiang, Soumya Sridar, Wei Xiong, Zhixiong Xie, Jun Wang. Effect of Multiple Repair Welding on Crack Susceptibility and Mechanical Properties of Inconel 718 Alloy Casting. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2022;31(1):254–261. https://doi.org/10.1007/s11665-021-06173-6

9. Kaimeng Wang, Hongyang Jing, Lianyong Xu, Lei Zhao, Yongdian Han, Kai Song, et al. Fracture Mechanism of a Ni-Base Alloy under High-Temperature Cyclic Deformation: Experiments and Microstructure Characterization. *Materials Characterization*. 2022;189:111944. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111944

10. Lyudmirskii YuG, Assaulenko SS, Ageev SO. Constructive and Technological Method of Increasing Durability of “Choke Connections”. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131:042061. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/4/042061

11. Gnyusov SF, Khazanov IO, Sovetchenko BF, Degtyarenko EA, Kiselev AS, Trushchenko EA, et al. *Application of the Effect of Superplasticity of Steels in Tool Production*. Monograph. Tomsk: NTL Publishing House; 2008. 240 p. (In Russ.)

12. Poletaev YuV, Poletaev VYu, Shchepkin VV. Friction Welding of Fittings and Nozzles from Low-Alloy Steel 15X2HMFA. *Welding International*. 2020;34(1–3):29–33. https://doi.org/10.1080/09507116.2021.1919446

13. Shchepkin V, Poletaev Yu. Friction Welding of Fasteners from Austenite Steels. *E3S Web of Conferences*. 2020;210:08012. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021008012

14. Schepkin V, Poletaev Yu. Friction Welding of Carbon Quality Steel. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;2131:042062. https://doi/org/10.1088/1742-6596/2131/4/042062

15. Poletaev YuV, Poletaev VYu, Shchepkin VV. Friction Welding of Fittings and Branch Pipes from Low-Alloy Steel 15Kh2NMFA. *Welding Production*. 2018;(7):13–18. (In Russ.)

16. Konovalov AV, Kurkin AS, Makarov EL, Nerovnyi VM, Yakushkin BF. *Theory of Welding Processes*. VM Nerovnyi (ed). Moscow: Bauman University Publ. House; 2007. 752 p. (In Russ.)

17. Shchepkin VV, Poletaev YuV, Rogozin DV. Method for Calculating the Parameters of the Friction Welding Mode of Conical Connections. In: *Proc. XXIV Int. Sci.-Pract. Conf. within the Framework of the Agro-Industrial Forum of the South of Russia, Exhibitions “Interagromash”, “Agrotechnologies”*. Rostov-on-Don: DSTU-PRINT; 2021. P. 490–493. https://doi.org/10.23947/interagro.2021.490-493 (In Russ.)

Поступила в редакцию 02.09.2023
Поступила после рецензирования 30.09.2023
Принята к публикации 17.10.2023

Об авторах:

Юрий Вениаминович Полетаев, доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры машин и автоматизации сварочного производства Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 7763-3543, ScopusID, ORCID, anclav51@mail.ru

Виктор Викторович Щепкин, ассистент кафедры машин и автоматизации сварочного производства Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), SPIN-код: 2093-6094, ScopusID, ORCID, shepkinviktor@rambler.ru

Заявленный вклад соавторов:

В.В. Щепкин — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Ю.В. Полетаев — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 02.09.2023
Revised 30.09.2023
Accepted 17.10.2023

About the Authors:

Yuri V. Poletaev, Dr.Sci. (Eng.), Senior Research Fellow, Professor of the Welding Fabrication Machines and Automation, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 7763-3543, ScopusID, ORCID, anclav51@mail.ru

Viktor V. Shchepkin, Teaching assistant of the Welding Fabrication Machines and Automation, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, 344003, RF), SPIN-code: 2093-6094, ScopusID, ORCID, shepkinviktor@rambler.ru

Claimed contributorship:

VV Shchepkin: basic concept formulation, research objective and tasks, calculations, text preparation, formulation of conclusions.

YuV Poletaev: academic advising, analysis of research results, revision of the text, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.